

також ще один, точніший, варіант апроксимації контуру труби шляхом оптимального її «мажорювання» двома еквіпотенціальними лініями [3].

В перспективі – розповсюдження даної методології на неоднорідні середовища з урахуванням процесу нагрівання повітря.

1. Куртнер Д. А., Чудновский А.Ф. Агрометеорологические основы тепловой мелиорации почвы. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 231 с.

2. Самарский А.А., Бабищев П.Н. Вычислительная теплопередача. – М., 2003. – 782 с.

3. Ляшко И.И., Великоиваненко И.М., Лаврик В.И., Мыстецкий Г.Е. Метод мажорантных областей в теории фильтрации. – К.: Наукова думка, 1974. – 200 с.

4. Радьгин В.М., Голубева О.В. Применение функции комплексного переменного в задачах физики и техники. – М.: Высш. шк., 1983. – 161 с.

*Отримано 03.07.2009*

УДК 697.14

Л.В.ГИРМАН

*Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка*

## **ПОКРАЩЕННЯ ТЕПЛОЗАХИСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ ЗАМКНУТИМИ ПОВІТРЯНИМИ ПРОШАРКАМИ**

Виконано дослідження, які дали можливість визначити, як впливають конструктивні характеристики повітряного прошарку на його опір теплопередачі. Проаналізовано характер змін опору теплопередачі замкнутого повітряного прошарку, визначено шляхи покращення теплозахисних властивостей огорожувальних конструкцій.

Выполнены исследования, которые дали возможность определить, как влияют конструктивные характеристики воздушной прослойки на ее сопротивление теплопередаче. Проанализирован характер изменений сопротивления теплопередаче замкнутой воздушной прослойки, определены пути улучшения теплозащитных свойств ограждающих конструкций.

Researches which enabled to define as structural characteristics of air layer influence on his heat-transfer resistance are executed. Character of changes of heat-transfer resistance of the reserved air layer is analyses. The ways of improvement of heat cover properties of external buildings constructions are define.

*Ключові слова:* огорожувальна конструкція, повітряний прошарок, опір теплопередачі, теплозахисні властивості, відбивна ізоляція, променевий тепловий потік, конвективний тепловий потік.

Теплотехнічна характеристика огорожувальної конструкції будинку або споруди повинна забезпечувати раціональне використання енергетичних ресурсів на обігрівання будівлі, а також нормативні санітарно-гігієнічні параметри мікроклімату приміщень. У статті наведено результати аналізу впливу різних факторів на опір теплопередачі пові-

тряного прошарку в огорождавательной конструкции. Це дає змогу проектувати більш економічні огорождавательні конструкції та одночасно зменшити витрати на опалення.

Наведені в [1, 2] методи розрахунку не дають можливості проаналізувати, як впливають конструктивні характеристики повітряного прошарку, зокрема його висота, ширина, шорсткість, наявність виступаючих елементів у поверхні й таке інше на загальний опір теплопередачі повітряного прошарку. Від яких факторів найбільш суттєво буде залежати коефіцієнт теплопередачі огородження з повітряним прошарком? Відповідь на ці питання можна одержати, якщо скористатися математичною моделлю, наведеною в роботі [3].

Мета даної роботи – проаналізувати, як впливають різні фактори на опір теплопередачі повітряного прошарку та розробити рекомендації щодо покращення теплотехнічних характеристик огорождавательної конструкції.

Перш за все проаналізуємо, як впливає відбивна ізоляція на опір теплопередачі повітряного прошарку. Аналіз виконаємо за допомогою математичної моделі [3], яка характеризує процес теплопередачі через повітряний прошарок і має вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\alpha_{k1}(t_1 - t_{cp})}{\delta} = \left( \lambda_T \frac{2h}{d_{екв}} + \sum \xi \right) \frac{v^2}{2} \rho_{cp} + \frac{\alpha_{k2}(t_{cp} - t_2)}{\delta}, \\ k_{\theta}(t_{\theta} - t_1) = \alpha_{k1}(t_1 - t_{cp}) + \alpha_{\lambda}(t_1 - t_2), \\ k_{\eta}(t_2 - t_3) = \alpha_{k2}(t_{cp} - t_2) + \alpha_{\lambda}(t_1 - t_2), \\ \frac{k_{\theta}(t_{\theta} - t_1)}{\delta} = \left( \lambda_T \frac{2h}{d_{екв}} + \sum \xi \right) \frac{v^2}{2} \rho_{cp} + \frac{k_{\eta}(t_2 - t_3)}{\delta}, \end{array} \right. \quad (1)$$

де  $\alpha_{k1}$ ,  $\alpha_{k2}$  – відповідно коефіцієнти теплообміну біля поверхні 1 і 2 повітряного прошарку,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$  (рис.1);  $t_1, t_2$  – температура поверхні 1 та поверхні 2,  $^\circ\text{C}$ ;  $t_{cp}$  – середня температура повітря в повітряному прошарку,  $^\circ\text{C}$ ;  $d_{екв}$  – еквівалентний діаметр прошарку, м;  $\sum \xi$  – сума коефіцієнтів місцевих опорів;  $v$  – швидкість переміщення повітря в прошарку, м/с;  $\rho_{cp}$  – густина повітря при середній температурі повітря в прошарку,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\alpha_{\lambda}$  – коефіцієнт променевого теплообміну,

$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$ ;  $k_e, k_n$  – відповідно коефіцієнт теплопередачі від повітря в приміщенні до поверхні 1 та від поверхні 2 до зовнішнього повітря,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$ ;  $\delta$  – товщина повітряного прошарку, м;  $\lambda_T$  – коефіцієнт тертя;  $h$  – висота повітряного прошарку, м;  $t_e, t_z$  – відповідно температура внутрішнього та зовнішнього повітря,  $^\circ\text{C}$ .

Для спрощення процесу аналізу, а точніше для спрощення розрахунків скористаємось програмою MathCAD. Математична модель (1) складається з чотирьох рівнянь і має чотири невідомі, тобто середню температуру повітря в прошарку, температури  $t_1, t_2$  і швидкість руху повітря.

Розглянемо конкретний приклад, коли конструкція складається з цегляної кладки з повітряним прошарком (рис.1). Товщина цегляної кладки з боку зовнішнього повітря – 120 мм, а з боку приміщення – 250 мм, коефіцієнт теплопровідності цегляної кладки становить

$\lambda = 0,77 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$ . Товщина прошарку  $\delta_{en} = 3 \text{ см} = 0,03 \text{ м}$ . Коефіцієнти теплообміну біля внутрішньої та зовнішньої поверхні огорожувальної конструкції відповідно дорівнюють  $\alpha_e = 8,7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$ ,  $\alpha_n = 23 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$ .

Коефіцієнт теплопередачі від повітря в приміщенні до поверхні 1, становить  $k_e = 2,275 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$ , коефіцієнт від поверхні 2 до зовнішнього повітря –  $k_n = 5,017 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$ . Температура зовнішнього повітря становить  $t_n = -23 \text{ } ^\circ\text{C}$ , внутрішнього (температура в приміщенні)  $t_e = 18 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Відбивна ізоляція впродовж останніх років відіграє певну роль серед ізоляційних матеріалів. Промислові експерти вважають, що кінець кінцем всі будівлі матимуть відбивну ізоляцію через її універсальність.

Розрахунки виконані для чотирьох випадків:

- 1 – огорожувальна конструкція без повітряного прошарку;
- 2 – огорожувальна конструкція із замкнутим повітряним прошарком без відбивної ізоляції (приведена ступінь чорноти для поверх-

ні 1 і 2 становить  $\varepsilon_{np} = 0,87$ );

3 – на поверхні 2 наклеєна одностороння відбивна ізоляція виконана із алюмінієвої фольги ( $\varepsilon_{np} = 0,055$ );

4 – на обох поверхнях повітряного прошарку наклеєна відбивна ізоляція ( $\varepsilon_{np} = 0,028$ ).

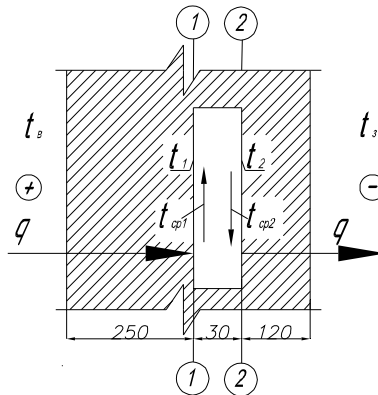


Рис.1 – Схема повітряного прошарку:  
1-1 – поверхня повітряного прошарку 1; 2-2 – поверхня 2.

Результати розрахунків наведено в табл.1.

Аналізуючи дані табл.1, бачимо, що при односторонній відбивній ізоляції опір теплопередачі замкнутого повітряного прошарку збільшився в  $\frac{0,645}{0,262} = 2,46$  рази, при двосторонній в  $\frac{0,692}{0,262} = 2,64$ . Тобто,

якщо повітряний прошарок покрити з одного боку відбивною теплоізоляцією, то опір теплопередачі зросте в 2,46 раз, а при покритті з обох сторін зростання порівняно з односторонньою відбивною ізоляцією є незначним.

Головний потік в процесі теплопередачі припадає на променеву складову теплового потоку, в першому випадку (табл.1), тобто при відсутності повітряного прошарку, вона складає 78% від загального теплового потоку. Слід зауважити, для того, щоб суттєво збільшити опір теплопередачі повітряного прошарку, необхідно зменшити променеву ступінь чорноти поверхонь повітряного прошарку. А це досягається за рахунок наклеювання відбивної теплоізоляції.

Замкнуті повітряні прошарки рекомендується [4] розташовувати ближче до холодного боку огорожувальної конструкції.

Таблиця 1 – Параметри у повітряному прошарку та параметри огороджувальної конструкції

№ п/п	Параметри у повітряному прошарку	Числові значення параметрів при різних випадках розрахунку			
		1 <sup>й</sup> випадок	2 <sup>й</sup> випадок $\varepsilon_{np} = 0,87$	3 <sup>й</sup> випадок $\varepsilon_{np} = 0,055$	4 <sup>й</sup> випадок $\varepsilon_{np} = 0,028$
1	Температура на поверхні 1, $t_1, ^\circ\text{C}$	-	-3,254	3,965	4,457
2	Температура на поверхні 2, $t_2, ^\circ\text{C}$	-	-13,364	-16,638	-16,861
3	Середня температура повітря у повітряному прошарку, $t_{cp}, ^\circ\text{C}$	-	-8,31	-6,338	-6,204
4	Швидкість переміщення повітря в прошарку, $v, \text{м/с}$	-	0,18	0,238	0,245
5	Променевий тепловий потік, $\text{Вт/м}^2$	-	37,66	4,967	2,620
6	Конвективний тепловий потік, $\text{Вт/м}^2$	-	10,688	26,965	28,189
7	Повний тепловий потік, $\text{Вт/м}^2$	64,163	48,348	31,932	30,809
8	Опір теплопередачі повітряного прошарку, $R_{\text{в.л}}, \frac{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{Вт}}$	-	0,262	0,645	0,692
9	Опір теплопередачі огороження, $R_0, \frac{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{Вт}}$	0,639	0,902	1,284	1,332
10	Коефіцієнт теплопередачі огороження $k_0, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$	1,565	1,109	0,779	0,751
11	Значення коефіцієнту теплопередачі огороження, %	100	70,86	49,78	47,99

Виконано також розрахунок, який характеризує вплив розміщення повітряного прошарку, тобто що краще, коли він знаходиться ближче до внутрішнього повітря чи до зовнішнього. Проаналізуємо, наскільки достовірні ці рекомендації, виконані на конкретному прикладі. При розрахунках змінювалася товщина стінок повітряного прошарку  $a$  і  $b$  (рис.2). Згідно з рис.2,  $\delta$  – загальна товщина стінок повітряного прошарку;  $a + b = 0,5 \text{ м}$  є також постійною величиною. При розрахунках товщина повітряного прошарку прийнята постійною  $\delta = 0,03 \text{ м} = \text{const}$ .

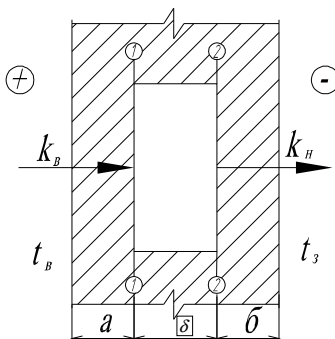


Рис.2 – Схема огороджувальної конструкції з повітряним прошарком

Параметри зовнішнього та внутрішнього повітря ті, що і в першому випадку, приведена ступінь чорноти  $\varepsilon_{np}=0,87$ . Результати розрахунків наведено в табл.2.

Таблиця 2 – Параметри у повітряному прошарку залежно від товщини стінок огородження (вплив розміщення повітряного прошарку)

№ п/п	Параметри у повітряному прошарку	Числові значення параметрів при різних розмірах $a$ і $b$										
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	Товщина стінки від внутрішнього повітря до поверхні 1 в прошарку, $a$ , м	0,05	0,1	0,12	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,38	0,4	0,45
2	Товщина стінки від поверхні 2 в прошарку до зовнішнього повітря, $b$ , м	0,45	0,4	0,38	0,35	0,3	0,25	0,2	0,15	0,12	0,1	0,05
3	Коефіцієнт теплопередачі від повітря в приміщенні до поверхні 1, $k_v$ , Вт/(м <sup>2</sup> °C)	5,559	4,085	3,693	3,228	2,669	2,275	1,982	1,756	1,644	1,576	1,429
4	Коефіцієнт теплопередачі від поверхні 2 до зовнішнього повітря, $k_g$ , Вт/(м <sup>2</sup> °C)	1,593	1,776	1,862	2,008	2,309	2,716	3,298	4,197	5,017	5,769	9,224
5	Температура на поверхні 1, $t_1$ , °C	10,574	7,941	6,893	5,326	2,741	0,181	-2,359	-4,874	-6,369	-7,367	-9,837
6	Температура на поверхні 2, $t_2$ , °C	2,889	0,116	-0,99	-2,644	-5,374	-8,08	-10,767	-13,43	-15,015	-16,07	-18,687

Продовження табл.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
7	Середня температура повітря у повітряному прошарку, $t_{cp}$ , °C	6,724	4,021	2,944	1,335	-1,321	-3,952	-6,565	-9,153	-	10,692	14,262
8	Швидкість переміщення повітря в прошарку, $v$ , м/с	0,668	0,643	0,619	0,597	0,475	0,294	0,185	0,085	0,038	0,022	0,009
9	Променевий тепловий потік, Вт/м <sup>2</sup>	33,784	33,412	33,269	33,05	32,684	32,314	31,94	31,565	31,342	31,18	30,79
10	Конвективний тепловий потік, Вт/м <sup>2</sup>	7,5	7,677	7,751	7,859	8,041	8,224	8,413	8,604	8,719	8,795	8,987
11	Повний тепловий потік, Вт/м <sup>2</sup>	41,284	41,089	41,02	40,909	40,725	40,538	40,353	40,169	40,061	39,975	39,777
12	Опір теплопередачі повітряного прошарку, $R_{в.л}$ , $\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{Wt}$	0,186	0,19	0,192	0,195	0,199	0,204	0,208	0,213	0,216	0,218	0,222
13	Коефіцієнт теплопередачі огороження $k_0$ , $\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{Wt}$	1,006	1,002	1,0	0,997	0,993	0,988	0,984	0,979	0,977	0,975	0,971

При віддаленні повітряного прошарку від внутрішнього повітря і наближенні до зовнішнього опір теплопередачі повітряного прошарку збільшується. Про це свідчать дані табл.2 і графік на рис.3.

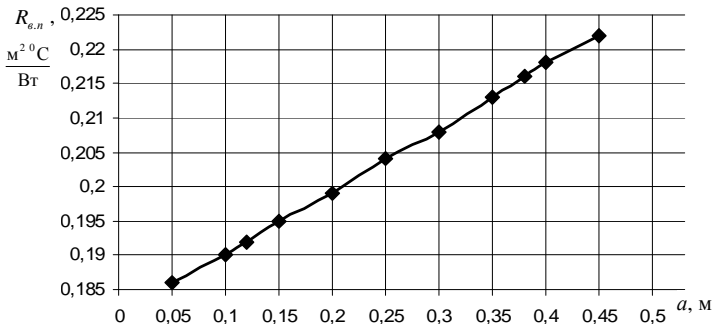


Рис.3 – Опір теплопередачі повітряного прошарку залежно від розташування його в огорожувальній конструкції

Таким чином, рекомендації відносно того, що замкнуті повітряні прошарки необхідно розташовувати ближче до холодної поверхні огорожувальної конструкції, досить обґрунтовані, оскільки це призводить до збільшення опору теплопередачі та зниженню втрат теплоти через огороження. Наші розрахунки підтверджують дані [4].

При аналізі розглянуто також випадок, коли товщина стінки від внутрішнього повітря до поверхні прошарку не змінюється і складає  $a = 0,12$  м (рис.2), а ширина конструкції від поверхні 2 повітряного прошарку до зовнішнього повітря збільшується в діапазоні від  $\delta = 0,12$  м до  $\delta = 0,77$  м. Були виконані розрахунки, на основі яких побудовано графік (рис.4).

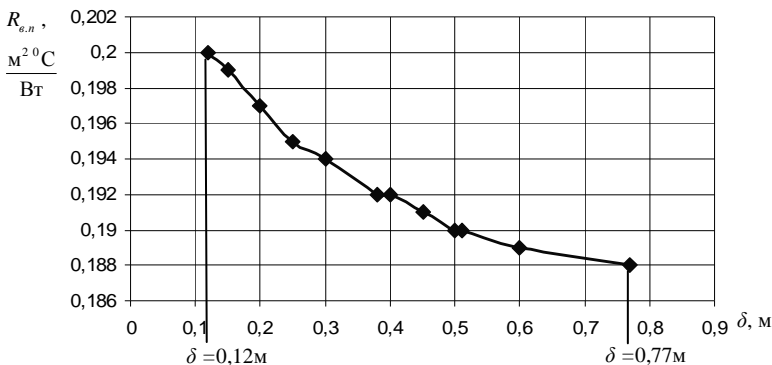


Рис.4 – Опір теплопередачі повітряного прошарку залежно від товщини зовнішньої стінки повітряного прошарку

Результати розрахунків свідчать, що коефіцієнт теплопередачі зовнішньої стінки повітряного прошарку впливає на опір теплопередачі самого прошарку. Із збільшенням опору теплопередачі зовнішньої стінки зменшується опір повітряного прошарку.

Було проаналізовано, як впливає температура зовнішнього повітря на опір теплопередачі повітряного прошарку. Розрахунок виконують для конструкції, яка розглядалася у першому випадку (рис.1). Результати розрахунків наведено в табл.3.

Аналізуючи дані табл.3, можна стверджувати, що при зниженні температури зовнішнього повітря збільшується опір теплопередачі повітряного прошарку. Це можна пояснити зміною співвідношення між променевим і конвективним тепловим потоком, і збільшенням впливу конвективного теплового потоку на процес теплопередачі. Променивий тепловий потік при зниженні температури зовнішнього



повітря збільшується менш інтенсивно, ніж конвективний, що призводить до зростання опору теплопередачі повітряного прошарку.

Таблиця 3 – Параметри у повітряному прошарку залежно від температури зовнішнього повітря

№ п/п	Параметри у повітряному прошарку	Температура зовнішнього повітря, $t_z, ^\circ\text{C}$			
		-23	-10	-0,3	+5,5
1	Температура повітряного прошарку на поверхні 1, $t_1, ^\circ\text{C}$	-3,254	3,311	8,319	11,359
2	Температура повітряного прошарку на поверхні 2, $t_2, ^\circ\text{C}$	-13,364	-3,345	4,078	8,499
3	Середня температура повітря у замкнутому повітряному прошарку, $t_{cp}, ^\circ\text{C}$	-8,31	-0,024	6,184	9,912
4	Швидкість переміщення повітря в прошарку, $v, \text{м/с}$	0,18	0,549	0,888	0,922
5	Променевий тепловий потік, $\text{Вт/м}^2$	37,66	27,192	18,535	13,007
6	Конвективний тепловий потік, $\text{Вт/м}^2$	10,688	6,223	3,485	2,102
7	Повний тепловий потік, $\text{Вт/м}^2$	48,348	33,415	22,02	15,109
8	Опір теплопередачі повітряного прошарку, $R_{в.л}, \frac{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{Вт}}$	0,262	0,199	0,193	0,189

Виконаний аналіз дає можливість проектувати більш економічні огорожувальні конструкції і зменшити витрати теплоти на опалення.

1. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. – М.: Стройиздат, 1973. – 287 с.

2. Богословский В.Н. Строительная теплофизика. – М.: Высш. школа, 1982. – 415 с.

3. Строй А.Ф., Гирман Л.В. Математична модель та алгоритм розрахунку теплопередачі через огорожувальну конструкцію із замкнутим повітряним прошарком // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып.86. – К.: Техніка, 2009. – С.188-196.

4. ДБН В.2.6-31:2006. Конструкції будинків і споруд. Теплова ізоляція будівель. – К., 2006.

Отримано 08.05.2009